极地水声信号处理研究

尹 力[1] 王 宁[2] 殷敬伟[3] 李启虎[1,4*]
1 中国科学院声学研究所 北京 100190
2 中国海洋大学 青岛 266100
3 哈尔滨工程大学 哈尔滨 150001
4 中国科学院大学 北京 100049

摘要 北极地区因其特殊的战略地位和地球持续变暖的趋势而备受关注。北极及其毗邻海域的水声学研究在北极海洋科学研究中占有重要的地位。极地水声信号处理较其他水声信号处理领域研究起步较晚，主要针对极区海域特别是北极海洋环境开展水声环境效应及其适配处理研究。文章介绍二战结束后开始的北极及其毗邻海域的水声学研究概况，并说明这一特殊海域的海洋水声研究的特点和有别于传统水声研究的内容。介绍北极水声环境研究的重要性，以及对水声信号处理、声呐装备的特殊要求，和我们应该采取的应对措施。

关键词 北极，水声信号处理，声呐，观测，通信，导航，定位

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.2019.03.008

1 水声信号处理在开发利用极区海域中的重要性

极地水声信号处理主要是针对极区海域，开展特殊海洋环境水声环境效应领域的适配处理理论与方法研究[1,2]。虽然高纬度地区的水声相关研究一般都被视为极地水声信号处理的一部分，但由于大部分国家地处北半球，更因目前国际上对北极开发极为关注，所以极地水声信号处理研究的焦点、热点通常集中在北极海域。

北极通常是指以北极点为中心，北纬 66°34' 以北包括整个北冰洋（及其岛屿）、北美洲、亚洲以及欧洲大陆的边缘海、边缘陆地所在的一片区域。世界上环绕北极的国家有 8 个，即加拿大、冰岛、美国、俄罗斯、丹麦、瑞典、芬兰、挪威。

北极地区是全球气候变化最为剧烈的地区之一，随着海水变暖造成的北极冰盖融化，北极的战略地位日益突出，也使其成为美、俄等大国博弈的焦点。我国于 2013 年成为北极理事会正式观察员国[3]。2018 年 1 月 26 日发布的《中国的北极政策》白皮书中，明确指出中国是近北极国家，是北极地区的利益

*通讯作者
资助项目：中国科学院前沿科学重点研究项目（QYZDY-SSW-JSC043）
修改稿收到日期：2019年3月7日

攸关方，中国愿和有关国家共建“冰上丝绸之路”。白皮书中强调：“要提高北极的科学研究水平和能力，不断深化对北极的科学认识和了解，探索北极变化和发展的客观规律”。

声波是水下信息远距离传输的有效载体，海洋声学是监测海洋生态环境的重要技术手段。在气候寒冷、大部分区域被海冰覆盖的复杂环境下，水声信号处理相关技术研究及声呐设备研发在开发利用北极的活动中，如冰下通信、导航、定位以及海洋环境、气候声学观探测等，具有不可替代的重要作用[1]。

2 极地水声环境

极地地理位置独特气候寒冷，海洋表面的浮冰不仅影响卫星通信，同时也隔绝了大气与海水的热交换，因此形成了特殊的声场环境。北冰洋的海冰覆盖面积通常在每年的3月份达到最大值，在9月份达到最小值。近30年间，由于全球变暖，使北极海冰覆盖面积逐年递减，厚度变薄。研究表明，北冰洋中心地带的多年海冰在20年内，厚度由3.1米减小至1.8米[4,5]。

海冰对冰下声传播的影响，主要体现为2个方面：① 海冰作为弹性介质，会有一部分声能透射其中，导致海水中声能量的损失；② 海冰-海水粗糙界面对声波具有散射作用。通常低频段声波传播损失主要来源于第一种原因；而随着频率升高，第二种原因的影响逐渐凸显。研究表明[6]，当声波频率达到900 Hz以上时，冰层的散射成为影响冰下声传播的主要因素。

北冰洋海冰密集区水下声速剖面结构呈正梯度，声道轴位于冰层覆盖的海面或其附近。向上折射的声线在冰层下表面处产生反射，形成了具有较强的频率选择性的半声道波导，优势传播频段为15—30 Hz。由于北冰洋航运噪声较低，且冰层隔绝风的影响，冰下噪声较开阔海域零级海况低。但冰块之间的碰撞和冰脊破裂使冰下噪声剧烈起伏[7]。

2000年以后，由于气候变暖，北冰洋夏季海冰的范围和厚度迅速减少。北极地区多年冰的比例大幅下降，只占北冰洋冰的30%，初年冰的比例上升[4]。气候变暖不仅影响海冰分布，同样引起冰下水体结构变化。由于暖水团的侵入，在表层冷暖混合水和中层冷水之间形成了“波弗特海透镜”，因此在经典的半波导声道下，100—200米深度之间形成了新的稳定声信道[8]，该声信道可以使中频声呐作用距离由100千米提高到400千米以上。

3 国外研究进展

极地水声信号处理较其他水声研究起步晚，主要服务于北极海域的军事活动。美国对北极冰下水声理论与军事应用的研究始于二战结束的1946年。美国海军北极潜艇实验室建立了北极声学野外工作站，相关冰下声呐技术研究成果帮助鹦鹉螺号核潜艇于1958年成功由冰下到达北极点。而苏联和北极水声探测有关的活动，则开始于20世纪50年代末。60多年来，北极被誉为“天然棱堡”，其冰层成为战略导弹核潜艇的天然掩体。

早期极地水声学研究依托建立在漂流冰面上的观测站开展，主要目的是了解北冰洋的水声环境，从而支持潜艇的冰下活动。冷战结束后，美国和俄罗斯曾于1994—2001年合作开展北极气候变化观测的ACOUS（Arctic Climate Observations using Underwater Sound）试验（图1）。自2007年俄罗斯北极海底“插旗”宣誓主权事件后，美国及西方盟友开始实施新的北极战略以确保其在北极事务中的领导地位。美国相继推出了“海军北极战略目标”（2010年）、“北极地区国家战略”（2013年）、“国防部北极战略”（2013年）、“北极地区国家战略实施计划”（2014年）和“美国海军北极路线图2014—2030”（2014年）系列北极战略计划，并针对

全球气候变化中的北极环境开展了大规模研究。鉴于水声环境对开发利用北极的重要性，同时冷战时期所获取的北极声学规律已“过时”，美国推出了加拿大海盆声传播试验CANAPE等相应的研究计划，力求通过对水声环境效应适配处理理论与方法的长期研究，确定“新”北极海域冰-海作用下水声及声呐信号处理的新模式及新参数（图2）。研究成果主要集中在北极长期声学监测、冰下导航以及通信组网等技术领域。

3.1 北极声学观测

通过ACOUS项目中首次完成的“跨北极声传播”TAP试验，充分证明了声传播对北冰洋的测温能力。进而开展的一系列声层析试验实现了流域尺度海水变暖的测量[10]。始于2008年并仍在持续二期研究的ACOBAR（Acoustic technology for observing the interior of Acoustic Ocean）计划[11]，是由欧盟支持的北冰洋声学观测项目。为实现长期环境变化观测的目标，该计划分别集成了两类试验平台：依托海底系泊潜标的声层析平台，以及由冰基漂流浮标与滑翔机组成的冰上系泊声学平台（AITP）。

美国海军研究办公室于2012年制定了“北极科学计划”（Arctic Science Program，ASP），旨在通过观测手段改善北冰洋海洋环境预报能力。前面提到的CANAPE项目作为该计划的重要组成部分，取得了声传播、噪声、物理海洋等研究领域的重要成果。

3.2 冰层测量探查

不同于水面船只，潜艇具有不受海冰覆盖和天气条件影响的优势，可以长时间、大范围地采集北冰洋

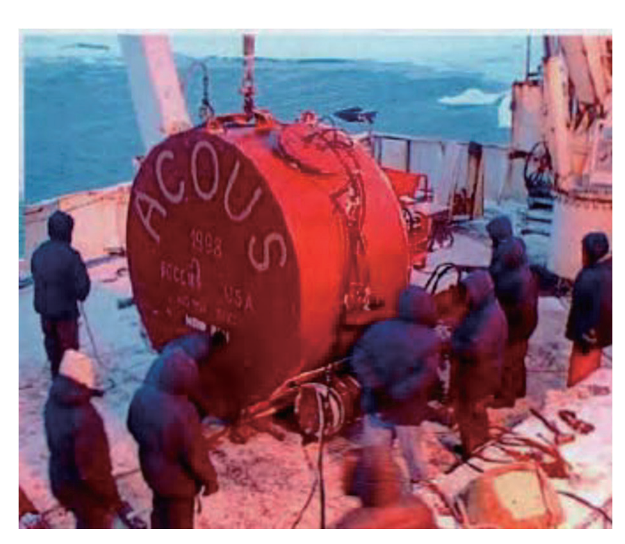
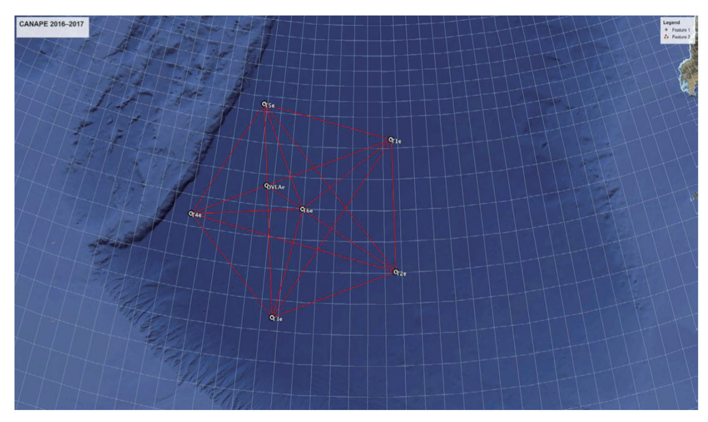




图1　美俄联合ACOUS试验



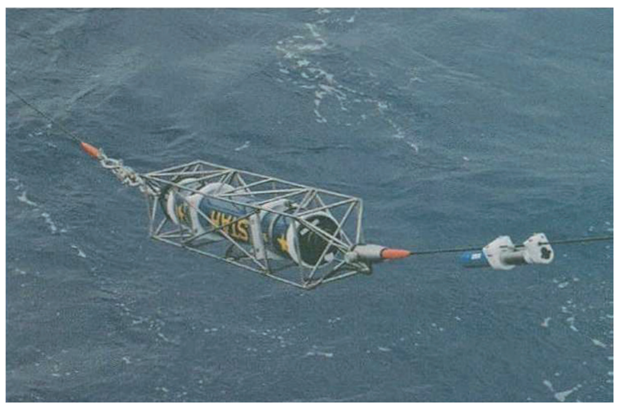


图2　2016—2017年加拿大海盆声学传播试验及所使用的DLVA阵列

区域有关数据，美军自20世纪70年代开始使用安装于核潜艇的测深侧扫仰视声呐测量北极冰层。SCICEX（the Science Ice Exercise）项目是美国军民融合开展的科学研究项目，旨在利用美军核动力潜艇去获取北冰洋地区有关海冰、水文、海深的复杂测量数据。美军曾多次使用鲟鱼级核动力潜艇开展试验，为美国全面掌握北冰洋区域情况提供了大量数据。1998年后，该任务名称改为科学适应任务（Science Accommodation Missions，SAM）。随着水下无人航行器（AUV）以及水下滑翔机的大规模应用，搭载AUV平台的小型仰视声呐取代潜艇执行了大量的冰下探查任务[9]。同时用于坐底式、锚锭式的定点仰视声呐起到了重要作用。

3.3 极区通信导航

冰原演习（ICE Exercise，ICEX）是美国海军在北冰洋进行的系列演习，旨在测试美潜艇在北冰洋环境下操作性和作战能力。2011年3月，在ICEX 2011中，美军高调推出Deep Siren低频远程水声通信系统，声称其具备在北极冰层下为潜艇提供实时战术任务和紧急情况信息的能力。在此次试验中，Deep Siren作为信标，将美军两艘潜艇由最远150海里处，成功地引导到Deep Siren所在的浮冰基地，通信距离估计超过150海里（图3）。

2014年，美国伍兹霍尔海洋学研究所（WHOI）与华盛顿大学在北冰洋波弗特海进行了冰下远程水声移动通信定位试验。试验中通过在冰面上钻孔的方式将换能器吊放在水下100米，水下滑翔机在距离100—400千米距离范围冰下低速航行。试验中通信距离超过400千米时的通信速率仍可达每秒数比特，成功地解决了滑翔机水下通信和定位的问题[8,12]。

4 国内研究突破

作为近北极国家，我国科技界对北极地区的事务始终非常关注，1999—2018年，我国已对北极进行了9次科学考察，内容涉及物理海洋与海洋气象、海冰、海洋地质、海洋地球物理、海洋化学、海洋生物与生态等学科，并取得了一系列成果（图4）。2014年刊出的《北极水声学：一门引人关注的新型学科》[1]，在国内率先提出针对北极及其毗邻海域开展声场特性及水声效应基础研究，填补我国北极声学研究空白，从而应对国家开发利用北极的利益需求。同时指出北极水声学研究存在着巨大的机遇和挑战，应在大气-冰-海-声耦合机理、低频声传播及最佳接收、冰下信道的频率选择特性、混响限制下的主动声呐信号检测、水声环境适应性等方向同时进行深入研究。

在原国家海洋局极地办公室和极地中心的大力支持下，2014年7月开始的我国第六次北极科学考察首次设立了水声学的科考内容，这对推动我国在北极声学方面的研究工作起到开创性的作用[2]；2016年，中国科学院声学研究所科考人员第一次搭乘雪龙号科考

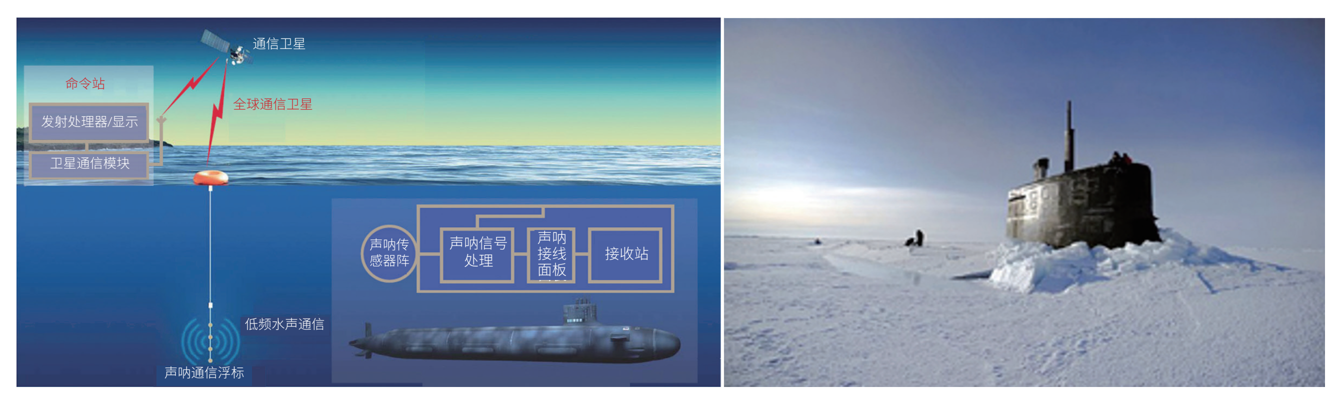


图3 Deep Siren低频远程水声通信系统浮标工作示意图

船赴北极进行了声学试验；2017、2018 年的北极科考，继续设置了水声学的考察内容，特别是我国第九次北极科学考察，中国科学院声学研究所、原国家海洋局第三海洋研究所、哈尔滨工程大学等单位在北纬 79°—84°、西经 154°—168° 区域内，共同开展了为期 15 天的北极及其毗邻海域声学综合观测实验（图 5）。实验完成了中低频声传播、声源定位、水声通信、冰区噪声和混响等项观测任务，最长连续观测时间 17 小时，最远工作距离 8 千米，并在北极首次使用了爆炸声源进行声学试验。

自 2014 年，中国科学院以“率先行动”的前瞻性战略眼光部署了北极声学的研究计划。由中国科学院重大科技任务局、前沿科学与教育局、国际合作局统筹安排了相关系列项目，并与国家海洋局签署了在海洋领域进行全面深入合作的战略合作框架协议。2016 年，哈尔滨工程大学获得国家自然科学基金委“冰下水声信道特性及水声通信技术研究”项目资助，并在 2018 年牵头承担科技部国家重点研发计划项目“极地海冰区声学特性研究与信息传输技术”，项目参加单位包括中国海洋大学、原国家海洋局第三海洋研究所、中国科学院声学研究所等国内多家相关研究机构。目前国内已在以下方面取得初步进展[14-16]。

（1）极地冰区海域水声环境特性研究。首先分别根据声能量进入作为弹性介质的海冰造成的反射损失，以及海冰-海水粗糙界面对声能量的散射作用，建立空气-冰-水边界反射系数模型，就海冰对中、低频段声波导的影响进行了理论分析，进而提出了改进的声场算法，力求准确描述海冰对声传播的影响。极地冰区混响模型同样考虑海水-冰面交界面不平整引起的散射和冰面介质分布不均匀性引起的散射，利用简正波的非相干叠加来获得混响平均强度关系。北极海域海冰活动导致的冰源噪声频谱特性和带宽受海冰活动过程变化影响，且具有较大的“瞬时”特性。

（2）极地冰区目标声特性研究。初步建立冰区目标源特性模型和极地环境声信道模型。基于极地冰区目标辐射噪声时空特性分析，开展目标辐射噪声谱特征远近程空间演变、时间演化模型建模。针对主动声呐探测的目标回波处理，分析冰层介质的界面虚源干涉与声反射衰减对目标的回波影响，解决冰层界面与目标回波特性的耦合问题。



图 4　“雪龙号”极地考察船

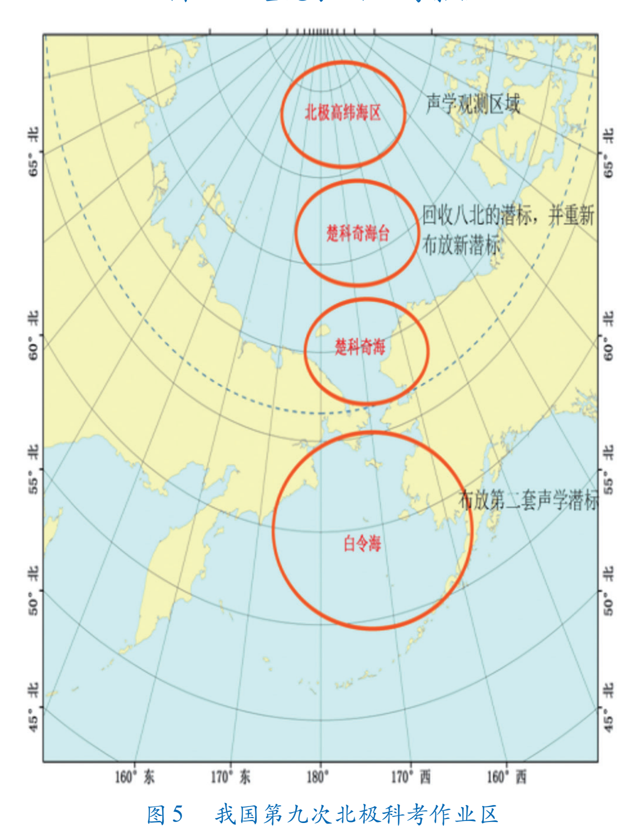


图 5　我国第九次北极科考作业区

（3）典型冰区水下声信道信息传输研究。针对冰水界面反射形成的冰下水声信道稀疏特性，以及浮冰区冰下水声信道动态变化的信道特点，研究收敛性能更快且稳态误差更小的稀疏水声信道估计方法。针对北极冰下水声移动通信中由于冰层界面空间起伏产生的非均匀多普勒干扰，研究多级级联的多普勒估计与补偿方案。针对冰层破裂、融化和撞击产生的脉冲噪声所具有的重尾特性，研究非高斯脉冲干扰环境下的信道估计方法。

另外，国内就海冰物理特性及其声学测量方法研究与设备研制、极区跨介质通信技术研究及设备研制、冰下无人航行器声导引及水声定位方法研究等北极科考亟待解决的技术问题取得了初步进展。

5 结语

目前，我国极地水声信号处理研究刚刚起步，既缺乏在北极地区开展声学实验的经验，也缺乏常规观测系统。但由于近年来建设“冰上丝绸之路”的国家发展需求，相关研究正迎来良好的发展机遇期，未来亟待加强基础理论及应用研究，如极地海洋环境综合观测及参数获取、极地海洋水声波导效应及应用，进一步开展极地环境下水声信号处理和声呐设备的适应性研究等。

参考文献

1 李启虎, 王宁, 赵进平, 等. 北极水声学：一门引人关注的新型学科. 应用声学, 2014, 33(6): 471-483.

2 李启虎, 黄海宁, 尹力, 等. 北极水声学研究的新进展和新动向. 声学学报, 2018, 43(4): 420-430.

3 贾桂德, 石午虹. 对新形势下中国参与北极事务的思考. 国际展望, 2014, (4): 5-28.

4 赵进平. 情系北冰洋. 北京: 中国环境出版社, 2006.

5 Kwok R U. The thinning of Arctic sea ice. Physics Today, 2011: 64(4): 3641.

6 Hope G, Sagen H, Storheim E, et al. Measured and modeled acoustic propagation underneath the rough Arctic sea-ice. The Journal of the Acoustical Society of America, 2017: 142(3): 1619-1633.

7 Roth E H, Hildebrand J A, Wiggins S M, et al. Underwater ambient noise on the Chukchi Sea continental slope from 2006-2009. The Journal of the Acoustical Society of America, 2012: 131(1): 104-110.

8 Freitag L, Ball K, Partan J, et al. Long range acoustic communications and navigation in the Arctic// MTS Oceans Conference. Washington D C: IEEE, 2015.

9 Wadhams P, Wilkinson J P, Kaletzky A. Sidescan Sonar Imagery of the Winter Marginal Ice Zone Obtained from an AUV. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2004, 21(9): 1462-1470.

10 Mikhalersky P N. Acoustics thermometry in the Arctic—Some history and future possibilities// Walter Munk Centennial Symposium. California: Scripps Institution, 2017.

11 Gavrilov A N，Mikhalevsky P N. Recent results of the ACOUS (Arctic Climate Observation using Underwater Sound) Program. Acta Acustica united with Acustica, 2002: 88 (5): 783-791.

12 Schmidt H, Schneider T. Acoustic communication and navigation in the new Arctic—A model case for environmental adaptation// 2016 IEEE Third Underwater Communications and Networking Conference(Ucomms). Lerici: IEEE, 2016.

13 殷敬伟, 杜鹏宇, 朱广平, 等. 松花江冰下声学试验技术研究. 应用声学, 2016, 35(1): 58-68.

14 刘崇磊, 李涛, 尹力, 等. 北极冰下双轴声道传播特性研究. 应用声学, 2016, 35(4): 309-315.

15 朱广平, 殷敬伟, 陈文剑, 等. 北极典型冰下声信道建模及特性. 声学学报, 2017, (2): 152-158.

16 黄海宁, 刘崇磊, 李启虎, 等. 典型北极冰下声信道多途结构分析及实验研究. 声学学报, 2018, (5): 274-282.

Research on Underwater Signal Processing in Arctic Region

YIN Li[1] WANG Ning[2] YIN Jingwei[3] LI Qihu[1,4*]

（1 Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2 Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

3 Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China）

Abstract Due to the special strategy role and the trends of global warming, the Arctic region attracts many interests. The underwater acoustics play a very important role in the ocean research work of Arctic region and its neighborhood. The research work of underwater signal processing in polar region is relative late than the other field of underwater acoustics. It focuses on polar region especially the Arctic ocean environment, studies the effects of underwater acoustic environment and its adaptive signal processing methods. In this paper, the outline of research work, since WWII, of underwater acoustics in Arctic region and its neighborhood is introduced. The specific research issues and results different from the traditional underwater acoustics in this special region are discussed. It is shown that the characteristics of Arctic ocean environment has more important role in underwater signal processing and sonar design, , some special treatments must be taken in matching the requirement of Arctic underwater acoustics.

Keywords Arctic, underwater signal processing, sonar, observation, communication, navigation, location



尹 力 中国科学院声学研究所研究员。1988年毕业于中国海洋大学。主要研究领域：水声信号处理、北极声学等。E-mail: yl@mail.ioa.ac.cn

YIN Li Professor of Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences (CAS). She received her BSc and MSc degrees in marine physics from Ocean University of China, and her Ph.D. degrees in acoustics from Institute of Acoustics, CAS. Dr. Yin's research interests focus on underwater signal processing and arctic acoustics. E-mail: yl@mail.ioa.ac.cn



李启虎 中国科学院院士，中国科学院声学研究所研究员。曾任中国科学院声学研究所所长，国家“863”计划海洋领域海洋监测主题专家组组长，中国科学院信息技术科学部常委会副主任。长期从事信号处理理论和声呐设计、研制工作。著作有《声呐信号处理引论》《数字式声呐设计原理》和*Digital Sonar Design in Underwater Acoustics: Principles and Applications*等。发表论文近100篇。1984—1986年曾应邀在美国普林斯顿大学电子工程和计算机科学系任访问学者。多次应邀在国际会议上作特邀报告或担任会议主席。获国家科技进步奖一等奖1次（1992年），1989年获国防科工委“献身国防事业勋章”，2010年获中国科协“全国优秀科技工作者”称号。E-mail: lqh@mail.ioa.ac.cn

*Corresponding author

LI Qihu Academician of Chinese Academy of Sciences, Professor of Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences (IACAS), former director of IACAS, Director of Expert Group of ocean monitoring in marine field in National "863" Program of China, Deputy Director of Standing Committee of Information Science and Technology Division of Chinese Academy of Sciences. His research interests are in the field of signal processing theory, sonar design, and development. Two books "An Introduction to Sonar Signal Processing", "Digital Sonar Design in Underwater Acoustics: Principles and Applications". and about 100 papers have been published. Professor Li has chaired international professional conference and has been invited to give keynotes speech in plenary session many times. He has received the first prize of National Science and Technology Advancement Award, medal of "Dedicating to National Defense" and has been named "National Outstanding Researcher". He has been a visiting scholar in EECS Department of Princeton University, USA during 1984—1986. E-mail: lqh@mail.ioa.ac.cn

■责任编辑：张帆

参考文献（双语版）

1 李启虎, 王宁, 赵进平, 等. 北极水声学：一门引人关注的新型学科. 应用声学, 2014, 33(6): 471-483.

Li Q H, Wang N, Zhao J P, et al. Arctic underwater acoustics: An attractive new topic in ocean acoustics. Journal of Applied Acoustics, 2014, 33(6): 471-483. (in Chinese)

2 李启虎, 黄海宁, 尹力, 等. 北极水声学研究的新进展和新动向. 声学学报, 2018, 43(4): 420-431.

Li Q H, Huang H N, Yin L, et al. Progresses and advances in Arctic underwater acoustic study. Acta Acustica, 2018, 43(4): 420-430. (in Chinese)

3 贾桂德, 石午虹. 对新形势下中国参与北极事务的思考. 国际展望, 2014, (4): 5-28.

Jia G D, Shi W H. On China's participation in Arctic governance under new circumstance. Global Review, 2014, 6(4): 5-28. (in Chinese)

4 赵进平. 情系北冰洋. 北京: 中国环境出版社, 2006.

Zhao J P. The Love of the Arctic Ocean. Beijing: China Environmental Press, 2006. (in Chinese)

5 Kwok R U. The thinning of Arctic Sea ice. Physics Today, 2011: 64(4): 36-41.

6 Hope G, Sagen H, Storheim E, et al. Measured and modeled acoustic propagation underneath the rough Arctic Sea-ice. The Journal of the Acoustical Society of America, 2017, 142(3): 1619-1633.

7 Roth E H, Hildebrand J A, Wiggins S M, et al. Underwater ambient noise on the Chukchi Sea continental slope from 2006—2009. The Journal of the Acoustical Society of America, 2012, 131(1): 104-110.

8 Freitag L, Ball K, Partan J, et al. Long range acoustic communications and navigation in the Arctic// MTS Oceans Conference. Washington D.C.: IEEE, 2015.

9 Wadhams P, Wilkinson J P, Kaletzky A. Sidescan sonar imagery of the winter marginal ice zone obtained from an AUV. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2004, 21(9): 1462-1470.

10 Mikhalersky P N. Acoustics thermometry in the Arctic—Some history and future possibilities// Walter Munk Centennial Symposium. California: Scripps Institution, 2017.

11 Gavrilov A N, Mikhalevsky P N. Recent results of the ACOUS (Arctic Climate Observation using Underwater Sound) Program. Acta Acustica United With Acustica, 2002, 88 (5): 783-791.

12 Schmidt H, Schneider T. Acoustic communication and navigation in the new Arctic—A model case for environmental adaptation// 2016 IEEE Third Underwater Communications and Networking Conference (Ucomms). Lerici: IEEE, 2016.

13 殷敬伟, 杜鹏宇, 朱广平, 等. 松花江冰下声学试验技术研究. 应用声学, 2016, 35(1): 58-68.

Yin J W, Du P Y, Zhu G P, et al. The research of the under-ice acoustic experiment technology. Journal of Applied Acoustics, 2016, 35(1): 58-68. (in Chinese)

14 刘崇磊, 李涛, 尹力, 等. 北极冰下双轴声道传播特性研究. 应用声学, 2016, 35(4): 309-315.

Liu C L, Li T, Yin L, et al. Acoustic propagation properties of two-axes channel under sea ice in the Arctic. Journal of Applied Acoustics, 2016, 35(4): 309-315. (in Chinese)

15 朱广平, 殷敬伟, 陈文剑, 等. 北极典型冰下声信道建模及特性. 声学学报, 2017, 42(2): 152-158.

Zhu G P, Yin J W, Chen W J, et al. Modeling and characterizing the typical under-ice acoustic channel for the Arctic. Acta Acustica, 2017, 42(2): 152-158. (in Chinese)

16 黄海宁, 刘崇磊, 李启虎, 等. 典型北极冰下声信道多途结构分析及实验研究. 声学学报, 2018, (5): 273-282.

Huang H N, Liu C L, Li Q H, et al. Multipath structure of the typical under-ice sound channel in Arctic: theory and experiment. Acta Acustica, 2018, 43(3): 273-282. (in Chinese)